

## 크레인 LMTT용 이동체의 구조최적설계

민경암\* · 이권희\*\* · 한동섭\*\*\* · 한근조\*\*\*\*

\*동아대학교 기계공학과 대학원, \*\*동아대학교 기계공학과 조교수, \*\*\*동아대학교 기계공학과 대학원 \*\*\*\* 동아대학교 기계공학과 교수

## Structural Optimization for LMTT-mover of a Crane

K. A. Min\* · K. H. Lee\*\* · D. S. Han\*\*\* · G. J. Han\*\*\*\*

\*Graduate school of Dong-A University, Busan 604-714, Korea

\*\*Division of Mechanical Engineering Dong-A University, Busan 604-714, Korea

\*\*\*Graduate school of Dong-A University, Busan 604-714, Korea

\*\*\*\*Division of Mechanical Engineering Dong-A University, Busan 604-714, Korea

**요 약** : LMTT는 항만 자동화를 위한 수평 이송이 가능하도록 설계된 셔틀카(shuttle car)와 격자구조의 레일에 부착된 스테이터 모듈(stator module)로 구성된 PMLSM(Permanent Magnetic Linear Synchronous Motor)에 의해 구동된다. 본 논문에서는 강도기준을 고려하고 경량화 설계를 위하여 쉘(shell) 요소로 유한요소 모델링된 이동체(mover)의 구조최적설계를 수행하였다. 설계변수로는 가로 빔, 세로 빔, 휠 빔의 두께와 높이 방향의 치수를 결정하는 형상 변수를 포함시켰다. 목적함수로는 중량, 제한조건 함수로는 안전율이 고려된 응력으로 설정하였다.

**핵심용어** : LMTT, 셔틀카, 이동체, 구조최적설계, 하역장비

**ABSTRACT** : LMTT (Linear Motor-based Transfer Technology) is a horizontal transfer system for the yard automation, which has been proposed to take the place of AGV (Automated Guided Vehicle) in the maritime container terminal. The system is based on PMLSM (Permanent Magnetic Linear Synchronous Motor) that consists of stator modules on the rail and shuttle car. It is desirable to reduce the weight of LMTT in order to control the electronic devices with minimum energy. In this research, structural optimization for a mover of shuttle car is performed to minimize the weight satisfying design criteria. The objective function is set up as weight. On the contrary, design variable is considered as transverse, longitudinal and wheel beam's thickness and shape variable determining the dimension toward high direction and the constraints are the stresses.

**KEY WORDS** : LMTT, Shuttle Car, Mover, Structural Optimization, Cargo-Working System

### 1. 서 론

세계 주요 항만에서 취급하는 컨테이너 무역규모가 급속히 증가함에 따라 이에 대처하기 위한 초대형컨테이너(Ultra Large Container Ship)의 출현, 항만시설의 자동화, 하역장비의 자동화 등 항만의 환경이 급격히 변화하고 있다.

20년 이내에 15,000~18,000 TEU급의 초대형 컨테이너선의 출현이 예상된다(D. S. Han et al., 2004). 항만 물류의 중요성이 국가 산업 경쟁력과 직결될 만큼 항만 물류산업이 고부가가

치의 매우 중요한 부분을 차지하고 있다. 이러한 항만의 빠른 변화에 능동적으로 대처하기 위해 각국은 차세대 선진항만 구현을 위한 새로운 아이디어와 전략에 노력을 기울이고 있다.

지금까지 항만 자동화를 위한 많은 기술들이 제안되어지고, 개발되어져 왔다. 기존의 터미널 내의 컨테이너 이송장치 자동화를 위한 해결 방안 중에 대표적인 것이 AGV(Automated Guided Vehicle)이다. 그러나 AGV는 저속도, 제어의 어려움, 무거운 중량 등 다양한 문제점들을 안고 있다. 이런 문제점들을 해결하고, 항만자동화 손쉽게 달성하기 위해 LMTT(Linear

\* 성희원, m2inam@naver.com 051)200-6981

\*\* 정희원(대표저자), leckh@donga.ac.kr 051)200-7638

\*\*\* 성희원, dshan@donga.ac.kr 051)200-6981

\*\*\*\* 송신희원, gjhan@daunct.donga.ac.kr 051)200-7650

Motor-based Transfer Technology)가 새로운 해결방안으로 제안되고 있다.

LMTT는 항만 자동화를 위한 수평 이송시스템이며, 셔틀카(shuttle car)와 격자구조의 레일(rail)에 부착된 스테이터 모듈로 구성된 PMLSM(Permanent Magnetic Linear Synchronous Motor)에 의해 구동된다. LMTT용 셔틀카를 설계하기 위해서 이동체는 영구자석편이 설치된 이동체와 레일 사이에 일정한 간격으로 설치된 스테이터 모듈에 의해 구동되므로 보다 효율적인 전기적 제어를 위해서는 이동체 구조의 경량화 설계가 요구된다. 이동체의 경량화를 위한 설계기법의 적용이 필수적이다.

본 연구에서는 큰 자유도를 갖고 셀로 유한요소모델링된 이동체의 효율적인 구조최적설계를 위하여 근사기법(formal approximation)이 의한 민감도 최적설계 알고리즘을 이용하였다. 설계변수로는 이동체의 가로 빔, 세로 빔, 휠 빔의 두께와 높이방향의 길이를 형상변수로 설정하였으며, 제한조건은 안전율이 고려된 강도로서 설정하였다. 유한요소해석 및 구조최적설계를 위하여 GENESIS를 사용하였다(Juan et al., 1998).

## 2. Mover의 유한요소모델링 및 구조최적설계이론

### 2.1 해석모델 및 경계조건

셔틀카의 구조는 Fig. 1과 같이 크게 프레임과 이동체로 되어 있다. 이동체위어 프레임이 고정되고 프레임의 위에 컨테이너가 놓여져서 이동체의 밑부분과 레일에 장착된 자석의 자력에 의한 스테이터 모듈에 의해 셔틀카가 움직이게 되는 것이다.



Fig. 1 Structure of shuttle car

유한 요소 해석을 위해 사용된 재료는 연강으로써 기계적 성질은 Table 1과 같다.

Table 1 Mechanical properties of mild steel

Property	Symbol	Value
Elastic modulus	E	210 GPa
Poisson's ratio	$\nu$	0.29
Density	$\rho$	$7.85 \times 10^{-9}$ Kg/mm <sup>3</sup>
Yield strength	$\sigma_y$	240 MPa
Tensile strength	$\sigma_t$	519 MPa

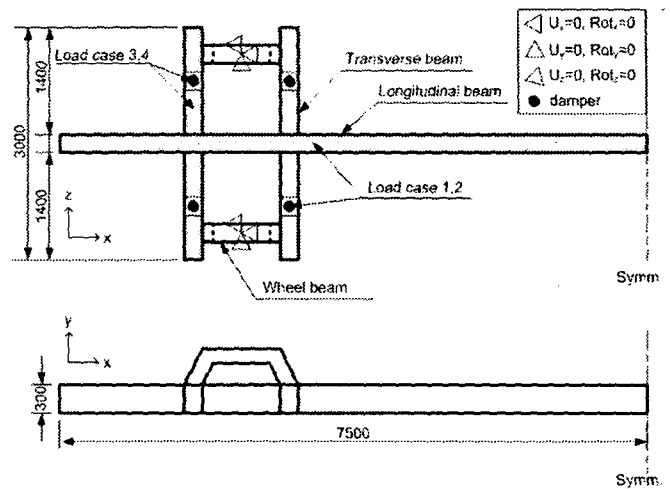


Fig. 2 Mover of a shuttle car

셔틀카의 이동체는 각각 가로 빔, 세로 빔, 휠 빔의 세 부분으로 구성되어 있으며, 전체 모델에서 y-z평면에 대칭이기 때문에 최적화 과정중의 과도한 유한요소해석 시간을 감소시키기 위하여 대칭구조의 한쪽 모델만을 이용하였다. 그 형상과 치수는 Fig. 2과 같다.

이동체는 Fig. 2와 같이 댐퍼의 4부분에서 프레임과 컨테이너의 무게 50ton을 받고 있다. 동시에 이동체는 신속한 제어를 위해서 정지나 출발시에 가로 빔과 세로 빔의 밑부분에 부착된 자석과 레일에 부착된 자석에 의해서 자기력으로 이동 방향에 따라 가로 빔과 세로 빔의 밑부분에 30ton의 힘이 들어 올려지거나 잡아당겨 진다. 따라서 최적화 과정 중에 고려된 하중 조건은 다음과 같다.

- 조건 1. 프레임과 컨테이너가 위에서 누르는 무게 50ton과 가로 빔 방향으로 움직일 때 가로 빔에 작용하는 부상력 30ton
- 조건 2. 프레임과 컨테이너가 위에서 누르는 무게 50ton과 가로 빔 방향으로 정지할 때 가로 빔에 작용하는 흡착력 30ton
- 조건 3. 프레임과 컨테이너가 위에서 누르는 무게 50ton과 세로 빔 방향으로 움직일 때 세로 빔에 작용하는 부상력 30ton
- 조건 4. 프레임과 컨테이너가 위에서 누르는 무게 50ton과 세로 빔 방향으로 정지할 때 세로 빔에 작용하는 흡착력 30ton

본 연구에서는 유한 요소 해석을 위해 각 절점에 6-자유도를 갖는 셀 요소를 사용하였으며 요소 수 및 절점수는 각각 15,668개, 15,596개이다.

### 2.2 구조최적설계이론

유한 요소법의 발달과 정식화로 구조물 설계는 최적설계의 적용이 가장 활발히 진행되고 있는 분야 중의 하나이다. 일반적으로 구조최적설계는 식 (1)~(5)와 같이 용력, 변위, 고유 진동

수 등의 제한 조건을 만족하며 구조물의 중량을 최소화하는 문제로 정의된다. 이 때 설계 변수로서는 구조물의 단면계수인 단면적 또는 관성 모멘트, 요소의 길이, 구조물의 형상, 절점의 좌표, 그리고 요소의 개수 등이 고려될 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Minimize} \quad & W(\mathbf{x}) & (1) \\ \text{Subject to} \quad & \sigma_i \leq \sigma_{all} \quad i=1, \dots, l & (2) \\ & \delta_j \leq \delta_{all} \quad j=1, \dots, m & (3) \\ & f_k \geq f_{all}, \quad k=1, \dots, p & (4) \\ & \mathbf{x}_L \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}_U & (5) \end{aligned}$$

여기서  $\mathbf{x}$ ,  $\mathbf{x}_L$ ,  $\mathbf{x}_U$ 는 설계변수 및 설계변수의 하한 값과 상한 값 벡터이고, 목적함수  $W$ 는 중량,  $\sigma$ ,  $\delta$ ,  $f$ 는 각각 응력, 변위, 고유진동수이다. 아래첨자  $all$ 은 허용값을 의미한다.

치수최적설계는 이산구조물(discrete structure)을 구성하는 단면의 높이, 너비 및 두께와 같은 치수 또는 면적, 관성모멘트 등을 설계변수로 한다. 그리고 연속구조물(continuous structure)인 경우에는 두께를 설계변수로 한다. 형상최적설계는 치수최적설계와 달리 절점의 위치를 이동시켜 최적의 해를 얻는 것으로, Vanderplaats는 절점의 위치를 이동시키기 위해 베이스(basis) 접근법이나 교란벡터(perturbation vector) 접근법을 이용하였다.<sup>[5]</sup> 베이스 접근법은 구조물의 초기 형상에 대해 그 구조물이 변할 수 있는 후보 모델을 선형으로 조합하여 최적해를 산출한다. 3차원 형상인 경우 선형조합을 다음식과 같이 표시할 수 있다.

$$x_i = x_{i0} + \sum_j^{n_s} DV_j(xb_{ij} - x_{i0}) \quad (6)$$

$$y_i = y_{i0} + \sum_j^{n_s} DV_j(yb_{ij} - y_{i0}) \quad (7)$$

$$z_i = z_{i0} + \sum_j^{n_s} DV_j(zb_{ij} - z_{i0}) \quad (8)$$

여기서  $x_i$ ,  $y_i$ ,  $z_i$ 는 절점  $i$ 의 새 좌표이며,  $x_{i0}$ ,  $y_{i0}$ ,  $z_{i0}$ 는  $i$ 의 초기 좌표이며,  $xb_{ij}$ ,  $yb_{ij}$ ,  $zb_{ij}$ 는 절점  $i$ 에 해당하는  $j^{th}$  베이스 벡터의 성분들이고,  $DV_j$ 는 설계변수  $j$ 의 값을 나타낸다. 그리고  $n_s$ 는 형상설계변수의 수이다. 이에 비해 교란 벡터 접근법은 베이스 접근법처럼 후보 모델을 선정하기 어려운 경우 직접 절점이 이동할 수 있는 방향을 입력하고, 설계 변수는 절점의 현재 위치에서의 교란 양을 결정하게 된다. Fig. 3은 베이스 접근법과 교란벡터 접근법의 차이를 나타내고 있다.  $P_0$ 는 절점의 초기 위치,  $P_1$ 는 절점의 새로운 위치가 된다. 설계변수 값이 0이면 절점의 위치는  $P_0$ 에서  $P_1$ 로 전진하고, 0보다 작은 값이나 1보다 큰 값이면 외간법으로 0과 1 사이의 값이면 내간법을 이용하여 형상이 결정된다. 두 방법 모두 설계 후보군의 선형조합을 이용하여 최적형상을 구하는

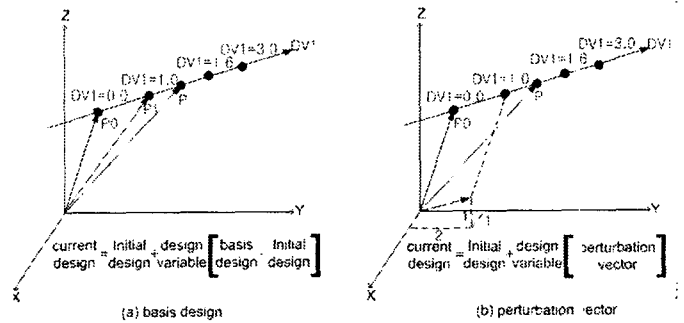


Fig. 3 Basis and Perturbation vectors

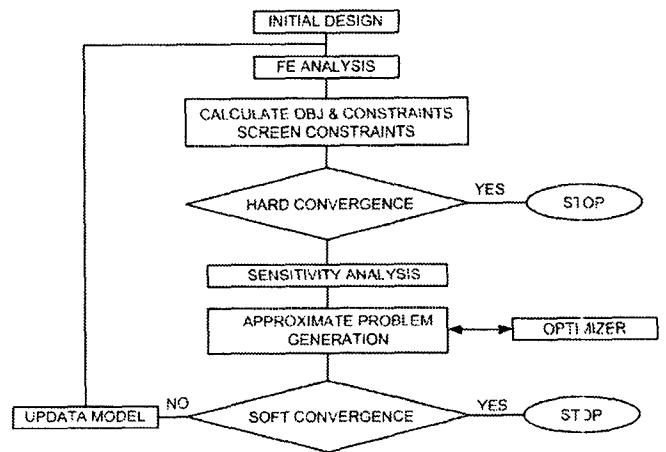


Fig. 4 Approximation method

것이다(Arora, 1989, K. H. Lee et al., 1998).

본 연구에서는 유한요소법의 해석수를 최대한 줄일 수 있도록 개발된 Fig. 4와 같은 근사기법을 이용하였다.

근사기법은 초기 모델에 대해 유한 요소 해석하고 목적함수와 제한조건들을 고려하게 된다. 그리고 제한조건들 중에서 충분히 만족되는 제한조건들은 제외시켜 계산시간을 줄이게 된다. 그런 뒤에 목적함수에 관련된 수렴조건을 만족하면 계산 과정이 끝나고 만족하지 않게 되면 민감도 해석을 하게 된다. 그리고 근사화문제를 산출하고 최적화 알고리즘(formal approximation)과 연동해서 계산을 하게 된다. 설계변수와 관련된 수렴조건을 만족하면 멈추게 되고, 그렇지 못하면 모델을 수정하여 유한 요소 해석부터 다시 시작하게 된다.

### 2.3 수정유용방향법(Modified feasible direction method)

본 연구에서는 Fig. 4의 최적화 알고리즘(optimizer)를 위해 수정유용방향법을 이용하였다.

유용방향법은 설계점을 한 유용 설계에서 개선된 유용설계로 순차적으로 이동시킨다. 따라서 유용설계  $\mathbf{x}^{(k)}$ 가 주어지면 개선하는 유용방향  $\mathbf{d}^{(k)}$ 를 결정하기 위하여  $\alpha > 0$ 에 관하여 다음의 두 성질을 만족해야 한다.

- 1) 새로운 설계  $\mathbf{x}^{(k+1)} = \mathbf{x}^{(k)} + \alpha \delta \mathbf{x}^k$ 는 유용
- 2)  $f(\mathbf{x}^{(k+1)}) < f(\mathbf{x}^{(k)})$

여기서  $\delta \mathbf{x}$ 는 방향벡터이다. 그러나 이 방법은 초기설계치가 유용설계에 있어야 한다는 단점이 있다. 이 문제를 수정유용방향법으로 해결한다.

$$\text{Minimize} \quad \nabla f(x) \cdot \delta x^k - \phi \beta \quad (9)$$

$$\text{Subject to} \quad \nabla f(x) \cdot \delta x^k \leq \beta \quad (10)$$

$$\nabla g_i(x) \cdot \delta x^k \leq \theta_i \beta \quad (11)$$

$$-1 \leq \delta x^k \leq 1 \quad (12)$$

여기서  $\phi$ 는 가중치이며, 보통  $\phi \geq 10^5$ 이다. 식 (11)에서  $i \in I_k$ (활성화 및 위배된 제한조건)이고, 식 (12)는 무계(Unbound)를 막아준다.

### 3. 최적설계 및 결과

#### 3.1 문제의 정식화 및 설계변수의 정의

개념 설계단계에서 이동체의 각 부재는 중실로 설계되었다. 그러나 이동체의 경량화를 위해서 중공 부재로 바꾸어 각 부재와 세로 빔과 가로 빔의 높이방향의 길이를 설정하여 구조 최적 설계를 수행하였다. 이때 중공부재의 초기 두께는 10mm로 하였다. 목적함수로서 중량을 설정하고, 제한조건 함수로는 안전율이 고려된 응력으로 설정하였다. 이를 위한 최적설계 정식화는 다음과 같다.

$$\text{Minimize} \quad W(t_1, t_2, t_3, h) \quad (13)$$

$$\text{Subject to} \quad \sigma_i \leq \sigma_{all} \quad j = 1, \dots, l \quad (14)$$

$$t_L \leq t_k \leq t_U \quad k = 1, 2, 3 \quad (15)$$

$$h_L \leq h \leq h_U \quad (16)$$

여기서, 안전율은 2.0과 1.5로 설정하여 각각의 경우에 대하여 최적설계를 수행하였다. 식 (13)부터 식 (16)에서  $t_1, t_2, t_3$ 는 각각 세로 빔, 가로 빔, 휠 빔의 두께이고,  $h$ 는 형상설계변수로서 가로 빔과 세로 빔 높이 방향의 길이를 조절하는 변수이다. 그리고  $\sigma_{all}$ 은 안전율이 고려된 허용응력이고,  $t_L$  및  $t_U$ 는 두께에 대한 설계변수의 하한값 및 상한값을 표시하며 각각 2mm와 30mm로 설정하였다. 또한  $h_L$  및  $h_U$ 는 형상설계변수에 대한 하한값과 상한값을 표시하며 각각 -100mm와 100mm이다. 설계변수에 대한 설명은 Fig.4에 표시하였다. 여기서 단면 A-A는 편의상 가로 빔의 단면만 보여주지만 세로 빔, 휠 빔의 단면도 동일

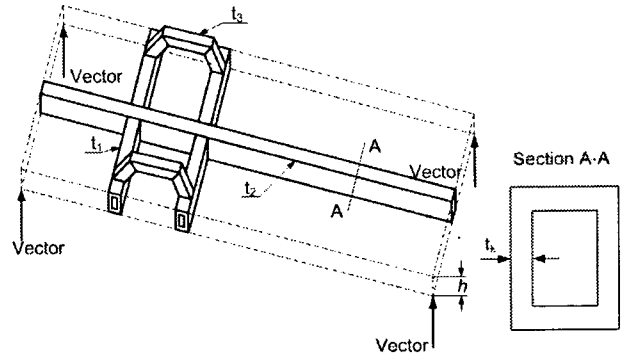


Fig. 4 Shape and size design variables

하다.

형상설계변수를 정의하기 위해 높이방향으로 설계영역(design domain)은 높이 방향으로 변화를 주기 위해 직육면체로 정의하고 교란벡터를 가중시켰다. 이와 같이 한 이유는 다른 구조물과의 간섭이나 제작 상에서 가로 빔과 세로 빔의 높이가 같아야 하므로 가로 빔과 세로 빔을 같이 잡았다.

이동체는 격자모양의 레일위에서 이동시와 정지시에 자기력에 의해서 30ton의 하중을 이동 방향에 따라서 가로 빔과 세로 빔의 하부에서 각각 받는다. 출발시에는 위로 밀어 올리는 힘을 받고 정지시에는 밀어서 끌어 내리는 힘을 각각 받게 된다. 그럴 때 각각의 경우에 대해서 하중조건을 4가지로 구분하였으며, 그 하중조건은 2.1절에 명시하였다.

부상력과 흡착력은 이동체가 출발시나 정지시에 보다 좋은 응답성을 위해서 출발 시에는 자기력으로 이동체를 위로 밀어 올리고 정지 시에는 이동체를 밀어서 잡아 당긴다. 그렇게 하기 위해서는 전력의 소모량이 크지만, 장시간 사용하는 것이 아니므로 빠른 응답성으로 인한 컨테이너 물동량의 처리가 전력의 소모량 보다 이득 된다.

#### 3.2 최적설계결과

안전율 2.0과 1.5에 대해서 최적화 과정의 반복 회수에 따른 중량의 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 안전율 2.0에서는 초기 모델에서 중량이 1.21에서 3.27로 169%로 증가 하였으며, 최대제한조건위배(maximum constraint violation)는 초기 198%에서 0%로 변화였고 16 반복회수 만에 수렴하였다. 안전율 1.5에서는 중량이 1.21에서 1.71로 41% 만큼 증가하였으며, 최대제한조건위배는 123%에서 0%로 변화였고 15 반복회수 만에 수렴하였다. 비록 초기 모델에서 중량이 증가하였지만, 개념설계 단계에서 각 부재가 중공이 아닌 중실이었다는 점을 감안 한다면 상당한 중량을 감소시키면서 최적의 치수 및 형상을 찾은 것이다.

각각 안전율 1.5와 2.0에서의 설계 변수들의 각 반복회수마다 변화된 것을 Fig. 6에 나타내었다. Table 2에는 최종적인 최적화된 두께들을 나타내었다. 휠 빔의 두께가 초기 두께에

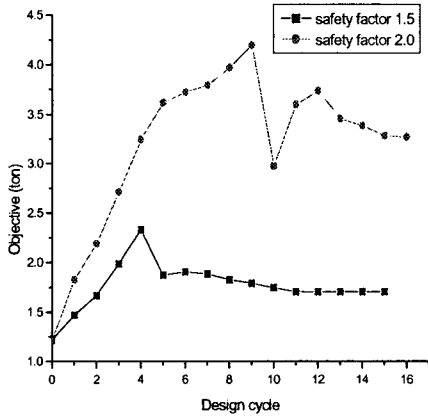


Fig. 5 The history of the objective function

비해 많이 증가 하였는데 이것은 구조물의 구조상 횡 빔 중앙 부에서 바퀴가 체결되어 구속을 하고 있고 횡 빔 끝단에서 가까운 곳에 댐퍼가 달려 위의 프레임과 컨테이너의 무게를 지탱하기 때문에 구조적으로 응력을 많이 받는 부분이기 때문이다. 그리고 안전율 1.5로 주었을 때 형상설계 변수가 5.661mm로 증가하였지만, 안전율 2.0에서는 57.356mm의 증가로 안전율에 따라 가로 빔과 세로 빔의 높이가 많이 차이가 나는 것을 알 수가 있다.

안전율 2.0일 때의 각 하중 조건별 최대응력 발생 부위를 Fig. 7 ~ Fig. 10에 나타내었다. 이 때 응력은 Von Mises 응력이다. 최대 응력의 크기 및 위치는 하중 조건에 따라서 다르게 나타났다. 하중조건 1, 3, 4의 경우에는 프레임과 컨테이너의 무게를 지탱하는 댐퍼가 장착된 부위에서 발생하였고, 하중조건 2의 경우에는 가로 빔과 세로 빔이 교차하는 밑부분에서 발생하였다. 그리고 각 하중별로 안전율 1.5와 2.0에서의 최대 응력을 Table 3에 표기하였다.

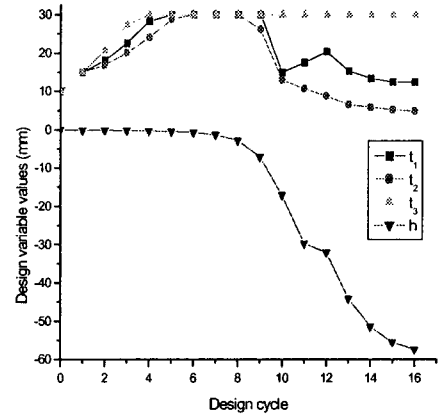
하중 조건별로는 하중조건 2 즉, 프레임의 무게와 컨테이너의 무게 50ton과 가로 빔 방향으로 이동 중 정지할 때 가로 빔 밑 부분을 당기는 흡착력 30ton이 작용할 때가 가장 가혹한 상태였다.

Table 2 Optimal value of design variables

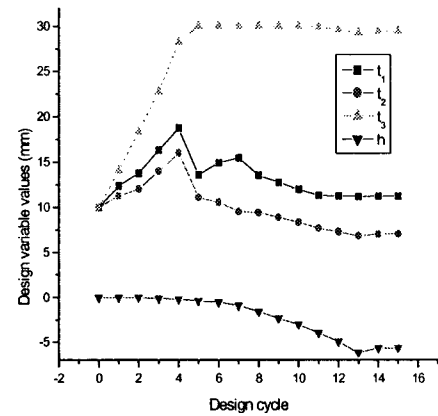
safety factor	$t_1^*(\text{mm})$	$t_2^*(\text{mm})$	$t_3^*(\text{mm})$	$h^*(\text{mm})$	$W^*(\text{ton})$
1.5	11.23	7.04	29.42	-5.66	1.71
2.0	12.47	4.84	30.00	-57.36	3.27

Table 3 Maximum stress of each load condition

safety factor	loading case			
	1 (MPa)	2 (MPa)	3 (MPa)	4 (MPa)
1.5	133.99	156.52	128.89	124.84
2.0	107.39	111.86	107.41	105.71



(a) Safety factor 2.0



(b) Safety factor 1.5

Fig. 6 History of the design variables

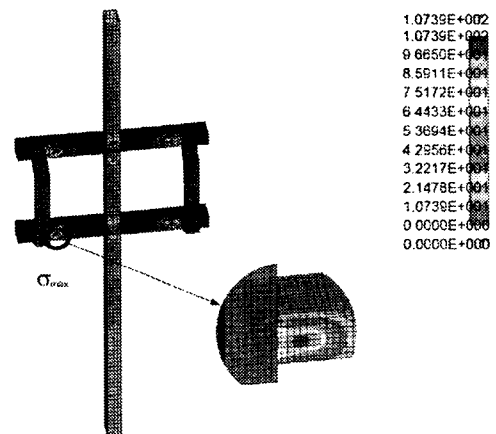


Fig. 7 Loading case 1 of safety factor 2.0

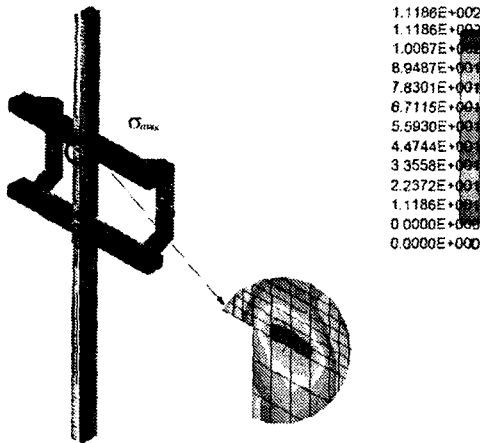


Fig. 8 Loading case 2 of safety factor 2.0

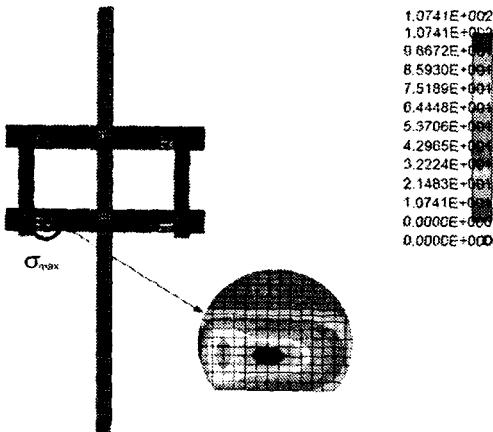


Fig. 9 Loading case 3 of safety factor 2.0

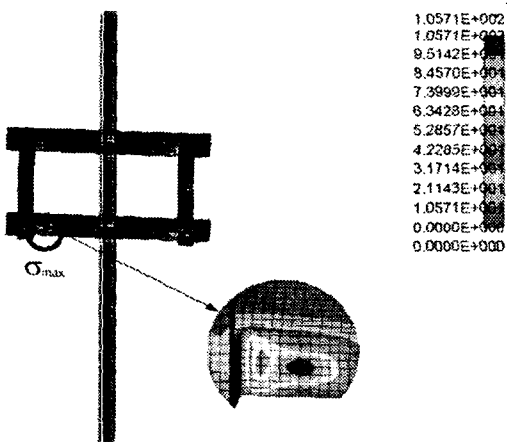


Fig. 10 Loading case 4 of safety factor 2.0

#### 4. 결 론

LMTT용 셔틀카의 이동체를 설계하기 위한 기초자료로 이동체를 구성하고 있는 구조의 두께 및 높이를 설계변수로 설정하고 강도 기준을 고려하여 구조최적설계를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. LMTT용 이동체의 설계시 수행되지 않았던 구조최적설계의 적용으로 인해 이동체에 대한 최적의 경량화를 구현할 수 있는 설계를 제시하였다.
2. 휠 빔은 각 하중의 굽힘응력에 대한 제한조건을 만족시키기 위해 설계변수의 상한값으로 최적해가 산출된다. 반면에 가로 빔과 세로 빔의 최적해는 하한값과 상한값 사이값으로 구해졌다.
3. 설계의 반복과정 중에 형상설계변수의 값이 크게 변하게 되면 유한요소해석 시 요소의 변형 및 파괴(mesh distortion)가 발생하는 문제가 생긴다. 그리고 구조의 연결부위는 약간의 형상의 변화에 대해서도 요소가 파괴될 가능성이 있다. 이는 형상최적설계의 근본적인 한계이다.

#### 후 기

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구결과로 수행되었음.

#### 참 고 문 헌

- [1] Arora, J. S. Introduction Optimum Design(1989), McGraw-Mill Book Company
- [2] GD. S. Han, G. J. Han, K. S. Lee, J. J. Shim, T. H. Kim(2004):"The effect of Thickness Rayio and Hight Ratio of Inner Beam on Strength and Stiffness of Frame in Shuttle Car for LMTT", Korean Institute of Navigation and Port Research Journal, Vol. 28, No. 3, pp.207-211.
- [3] GENESIS User's Manual 5.0, VMA Engineering, 1998.
- [4] Juan Pablo Levia and Brain C. Watson(1998): "Automatic Generation of Basis Vectors for Shape Optimization In The GENESIS Problem", AIAA-98-4852, pp.1115-1122
- [5] K. H. Lee, J. K. Shin, S. I. Song, T. M. Yoo, G. J. Park(2003):"Automobile door design using structural optimization design of experiment", J. Automobile Engineering, Vol. 217, pp.855-865